

MODELO NUMÉRICO DEL RÍO DE LA PLATA Y SU FRENTE MARÍTIMO PARA LA PREDICCIÓN DE LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO

Mariano Ré*, Ángel N. Menéndez*

* Instituto Nacional del Agua (INA)
Casilla de Correo 21, 1802 Aeropuerto Ezeiza, Argentina
Facultad de Ingeniería, UBA
e-mail: m.re@ina.gov.ar, web page: <http://www.ina.gov.ar/>

* Instituto Nacional del Agua (INA)
Casilla de Correo 21, 1802 Aeropuerto Ezeiza, Argentina
Facultad de Ingeniería, UBA
e-mail: menendez@ina.gov.ar, web page: <http://www.ina.gov.ar/>

Palabras clave: Hidrodinámica, Simulación Numérica, Cambio Climático, Río de la Plata.

Resumen. *Se describe la implementación, calibración y operación de un modelo hidrodinámico bidimensional del Río de la Plata y su Frente Marítimo, denominado RPP-2D, para la predicción de efectos de Cambio Climático. Se muestra que el modelo resulta adecuado para el fin propuesto. La reproducción de las respuestas a la acción del viento depende de la calidad de los datos sobre campos de vientos, la cual no es homogénea para la fuente utilizada (NCEP/NCAR). El modelo es capaz de proveer la información necesaria para obtener los períodos de retorno de inundaciones en alta resolución espacial para condiciones presentes y futuras.*

1 INTRODUCCIÓN

Existen varios antecedentes relativamente recientes que ofrecen una caracterización física del Río de la Plata, incluyendo la plataforma continental^{1,2,3,4}. De todos modos, la única forma de disponer de una representación operativa de la hidrodinámica consiste en recurrir a la modelación numérica de los fenómenos.

Hay una larga experiencia en el desarrollo y aplicación de modelos numéricos hidrodinámicos al Río de la Plata, tratado como un cuerpo de aguas poco profundas para el cual es suficiente una descripción bidimensional en el plano horizontal. Aunque hubo intentos iniciales en la década del 70, el primer desarrollo sistemático de un modelo hidrodinámico fue presentado en 1986⁵, utilizando el software HIDROBID II⁶. Mejoras y aplicaciones de este modelo siguieron en tesis sucesivas^{7,8}. Desde entonces, muchos otros modelos del río han sido desarrollados⁹. Una nueva versión del modelo del INA, denominada RP2000, tiene una gran resolución espacial (malla de 1 km de lado) y ha sido cuidadosamente calibrado¹⁰. Dada la necesidad de incluir el Frente Marítimo, a partir del RP200 se desarrolló el modelo RPP-2D¹¹ sobre un dominio ampliado.

Los modelos del INA fueron utilizados en una variedad de aplicaciones ingenieriles y ambientales. En este trabajo se presenta la utilización del RPP-2D en estudios de Cambio Climático.

2 CAMBIO CLIMÁTICO EN EL RÍO DE LA PLATA

El cambio climático se está manifestando significativamente en la Argentina. La forma más evidente es a través del exceso hídrico en varias zonas del país, el cual está produciendo impactos tanto negativos como positivos sobre el devenir socio-económico. Esta afectación del régimen hidrológico, aún no claramente comprendida, necesita ser estudiada para permitir establecer nuevos criterios de gestión y planificación urbana y rural.

El Río de la Plata, en particular, está experimentando un incremento de su nivel medio por el aumento del nivel del mar y, posiblemente, por el cambio en la dirección de los vientos estacionales predominantes y el incremento del caudal de los tributarios principales (ríos Paraná y Uruguay). Además, está aumentando la frecuencia de las ondas de tormenta. Estos efectos significan una mayor vulnerabilidad de la zona costera a las inundaciones.

El mayor nivel del agua en el Río de la Plata, registrado en el Puerto de Buenos Aires, fue de 3.90 m por sobre el nivel medio del mar. Un área extensa del Ámbito Metropolitano de Buenos Aires se encuentra bajo la cota de 5 m. La zona de potencial impacto no sólo son las áreas costeras del Río de la Plata, también se extiende hacia las populosas márgenes de los ríos Matanza-Riachuelo y Reconquista. Alrededor de 1.500.000 personas habitan esta región, lo que da cuenta de la magnitud del problema ante evidencias de intensificación de efectos.

Para estudiar este problema, se conformó un grupo de trabajo de climatólogos, hidrólogos, geólogos y científicos sociales de la UBA, capaz de analizar el problema desde las causas (el clima) hasta los impactos socio-económicos, pasando por la respuesta hidrológica del río. En este trabajo se describe el estado de avance de los estudios en relación al comportamiento hidrológico del sistema.

3 DINÁMICA DEL SISTEMA

La onda de marea que ingresa desde el océano, la descarga de los tributarios que penetra en la cabecera del río y los vientos que actúan sobre toda la superficie del agua son los forzantes principales de la dinámica del Río de la Plata. La oscilación astronómica mareal produce variaciones en características físicas tales como la salinidad, la profundidad de la haloclina y la mezcla vertical a una escala horaria; los vientos influyen en las variaciones de la altura del agua y la salinidad a escala diaria; el caudal fluvial varía a las escalas mensual e interanual¹².

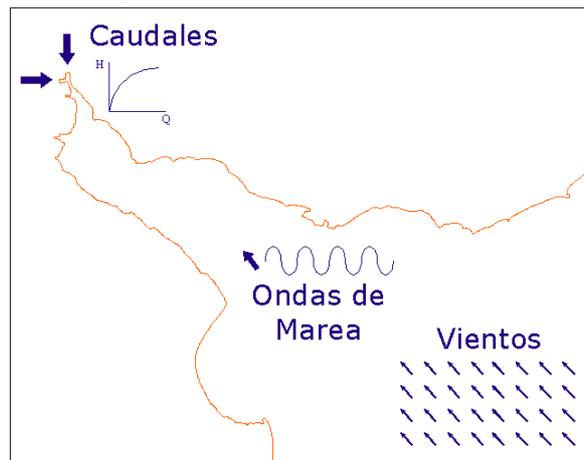


Figura 1: Forzantes del sistema.

La onda oceánica que llega al Río de la Plata tiene un régimen de desigualdades diurnas, presentando entonces grandes diferencias entre pleamares o bajamares consecutivas. Debido a las características semidiurnas de este régimen, en el Río de la Plata se da el caso de que se produzcan simultáneamente una pleamar y una bajamar y dos pleamares y una bajamar o viceversa¹³. La componente de mareas M_2 representa más del 65% de la energía presente en la marea¹⁴. La singularidad del Río de la Plata se basa en su régimen astronómico micromareal, con pocas decenas de centímetros de amplitud, y en la alta relevancia de las componentes meteorológicas. Este particular comportamiento del Río de la Plata puede explicarse por la proximidad de dos puntos anfídromicos en la región del Atlántico Sur. Las ondas de marea oceánicas llegan al Río de la Plata con una velocidad aproximada de 200 km/h y se propagan en su interior con una velocidad media de 30 km/h, demorando aproximadamente 12 horas en recorrerlo. Los factores que se oponen a su desarrollo son el desagüe fluvial y las acciones combinadas de la fricción, la pendiente y la forma del río¹⁵.

Más del 97% del ingreso de agua al Río de la Plata es aportado por los ríos Paraná y Uruguay. La descarga del río Santa Lucía, relativamente cercana a Montevideo, es despreciable con respecto a la totalidad del sistema, aunque es un importante factor local para las costas uruguayas. El río Paraná llega al Río de la Plata principalmente por dos de sus brazos, el Paraná de las Palmas, con alrededor del 25% del caudal total, y el Paraná Guazú-Bravo, con el 75% restante¹⁶. El caudal medio del Río de la Plata es del orden de los 23.000 m^3/s ¹⁷.

La forma, la extensión y el régimen micromareal determinan que los procesos atmosféricos, especialmente el régimen de vientos, tengan una importancia fundamental en la dinámica del río. El viento actúa sobre la superficie del agua variando los niveles, la velocidad de propagación de la onda de marea y la mezcla en la vertical. El Río de la Plata está situado bajo la influencia del anticiclón del Atlántico Sur. Por lo tanto, los patrones climáticos dependen principalmente de la posición de esta característica importante de circulación. Entonces, los vientos del Norte y del Noreste prevalecen durante todo el año. En invierno, el desplazamiento hacia el Norte de un intenso frente de presión subtropical provoca un incremento de la frecuencia de los vientos del Oeste, mientras que en verano se presentan flujos del Este y del Sudeste. La intensidad promedio en la región es bastante uniforme, de alrededor de 5 m/s¹⁸.

4 SOFTWARE

El software HIDROBID II^{19,20} es el utilizado para la implementación del modelo hidrodinámico del Río de la Plata y su Frente Marítimo RPP-2D. Este software simula numéricamente flujos cuasi-bidimensionales (en el plano horizontal) a superficie libre. Está basado en la resolución numérica de las ecuaciones para aguas poco profundas (shallow water equations). Las bajas profundidades de la zona a modelar, en relación con la longitud de onda de la onda de marea, justifican la utilización de este software^{21,22}. Dado su carácter barotrópico, el software no puede representar la estratificación vertical debido al efecto de la salinidad.

El modelo teórico considera como fuerzas motrices a la gravedad, a la aceleración de Coriolis (fuerza de inercia debida a la rotación de la Tierra) y a las tensiones superficiales debidas a la acción del viento. Por otro lado, tiene en cuenta la resistencia al movimiento proveniente de la generación de turbulencia en el fondo (históricamente denominada “fricción”). Supone que la forma del fondo es arbitraria, pero sin variación en el tiempo (fondo fijo) y sin cambios bruscos. Sin embargo, es capaz de asimilar cambios bruscos de profundidad a través de tratamientos especiales²³. Considera que la pendiente del fondo es pequeña. La hipótesis de flujo cuasi-bidimensional significa que el movimiento es esencialmente bidireccional y la velocidad es prácticamente uniforme a lo largo de la dirección vertical y que, en consecuencia, la aceleración vertical es despreciable frente a la de la gravedad, resultando entonces una distribución hidrostática de presiones.

Las ecuaciones para aguas poco profundas provienen del filtrado sobre el ensamble estadístico de las ecuaciones de Navier-Stokes (ecuaciones de Reynolds), seguido de la integración vertical y de la aplicación de las hipótesis simplificativas del modelo teórico, resultando²⁴:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(hu) + \frac{\partial}{\partial y}(hv) = 0$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - f_g v + g \frac{\partial(h+z_0)}{\partial x} + \frac{\tau_{fx}}{\rho h} - \frac{\tau_{sx}}{\rho h} - \frac{1}{\rho h} \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xx}) - \frac{1}{\rho h} \frac{\partial}{\partial y}(hT_{xy}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + f_g u + g \frac{\partial(h+z_0)}{\partial y} + \frac{\tau_{fy}}{\rho h} - \frac{\tau_{sy}}{\rho h} - \frac{1}{\rho h} \frac{\partial}{\partial x}(hT_{xy}) - \frac{1}{\rho h} \frac{\partial}{\partial y}(hT_{yy}) = 0$$

donde x e y son las coordenadas espaciales, u y v las velocidades medias verticales en esas direcciones, respectivamente, f_g el factor geotrófico, τ_{sx} y τ_{sy} las componentes de la tensión de corte sobre la superficie del agua debida al viento, τ_{fx} y τ_{fy} las componentes de la tensión de corte sobre el fondo y T el tensor de las tensiones efectivas.

El esquema numérico de resolución de estas ecuaciones utilizado en el software HIDROBID II se basa en el método de las diferencias finitas. La malla de discretización es del tipo alternada (las dos componentes de la velocidad y el nivel de agua están todos centrados en nodos diferentes) y el método es del tipo implícito de direcciones alternadas²⁵.

5 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO

El dominio de cálculo del modelo RPP-2D, está delimitado por contornos físicos y matemáticos. Los contornos físicos son las costas uruguaya y argentina. Los contornos matemáticos se desarrollan sobre el Frente Marítimo: los paralelos 35,8°S al Norte y 40,5°S al Sur y el meridiano 51,5°W al Oeste. El Frente del Delta del Paraná es considerado también como un contorno físico, con la excepción de las desembocaduras de los ríos Paraná de las Palmas, Paraná Guazú-Bravo y Uruguay, que constituyen contornos matemáticos.

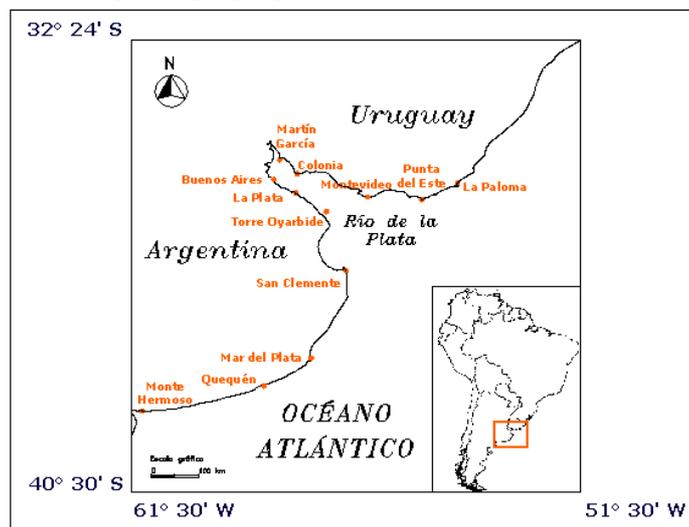


Figura 2: Dominio del modelo RPP-2D.

La información batimétrica del modelo RPP-2D se obtuvo a partir de la suma de dos bases

de datos, una provista por el Servicio de Hidrografía Naval de la Argentina²⁶ del Río de la Plata y su Frente Marítimo y la otra aportada por el mismo SHN consistente en datos de profundidades digitalizados del plano batimétrico del Río de la Plata²⁷ y de las cartas náuticas H-113 y H-116 del SHN. Los datos de la segunda reemplazaron a los datos de la primera en el dominio coincidente. En el modelo numérico del terreno se adoptó una malla de discretización espacial rectangular, con celdas de 2500 m de lado ($\Delta x = \Delta y$), sobre un sistema de coordenadas orientado según las direcciones cardinales. De esta manera resultó una grilla de 382 celdas en la dirección Este-Oeste y 408 celdas en la dirección Norte-Sur, de las cuales alrededor del 55% caen sobre el continente, de modo que no intervienen directamente en el cálculo. A partir de la base de datos batimétricos se asignaron valores de profundidad a cada una de las celdas de la malla mediante un proceso de interpolación con la técnica de “kriging”. Las profundidades así generadas están referidas al plano de reducción local, cuya distancia a la superficie del geoide es variable, por lo tanto, la superficie de referencia de las profundidades no es una equipotencial. Se espera que los resultados del modelo no estén fuertemente afectados por ella, excepto por el nivel medio del agua, que sí puede presentar diferencias significativas con el obtenido de los registros.

El efecto de la rugosidad del fondo es significativo sólo en el interior del Río de la Plata, donde las profundidades son bajas, perdiendo importancia ya en la zona exterior del río y, con mayor razón, en el Frente Marítimo. En consecuencia, se adoptó para toda el área de extensión del modelo RPP-2D un valor uniforme del coeficiente de rugosidad de Manning de 0,015.

La descarga de cada uno de los tres tributarios considerados (Paraná de las Palmas, Paraná Guazú-Bravo y Uruguay) se impone como una condición de borde en la cara de la celda respectiva que representa su punto de entrada. Puede considerarse una descarga constante en el tiempo, si el interés es el de representar condiciones medias, o bien ingresarse el detalle de los hidrogramas de descarga (a escala diaria), si se desea analizar efectos de eventos hidrológicos. No es necesario incluir en la especificación de la descarga de los tributarios el efecto de modulación causado por la onda de marea²⁸.

El modelo tiene tres bordes oceánicos (Este, Norte y Sur), que constituyen contornos matemáticos. El Borde Este fue considerado como un contorno impenetrable, en base al argumento de que la energía de onda que lo atraviesa es muy baja en relación con la que se propaga a lo largo de la plataforma continental. El Borde Norte fue tratado como un contorno no reflejante, permite la salida de las ondas que inciden sobre él sin reflejar información. La onda de marea astronómica es impuesta como condición de contorno en el Borde Sur del modelo, en base al conocimiento existente de que en esta región la onda efectivamente se propaga de Sur a Norte. A partir de la costa se supuso un decaimiento exponencial de la amplitud en dirección al Este, en concordancia con su carácter de onda de Kelvin.

Los campos de vientos actuantes sobre la superficie del agua fueron generados a partir de los reanálisis de NCEP/NCAR²⁹. Estos tienen una resolución espacial de 1,9048° de latitud y 1,875° de longitud y temporal de 6 horas. La base de datos se corresponde con una grilla T62 Gaussiana con 192 x 94 puntos ubicados dentro de las latitudes 88,54N-88,54S y 0E-358,125E. Dado que los campos de vientos de NCEP/NCAR subestiman las intensidades de

los vientos observados, siguiendo la experiencia del modelo HANSOM-CIMA³⁰ estas intensidades fueron incrementadas en un factor de la forma $1+\exp[-(W/X)^m]$, donde W es el módulo de la velocidad del viento, X un valor de velocidad (del orden de las intensidades mayores de la base de datos) y m un exponente. La utilización de este factor busca duplicar los valores de las intensidades muy bajas de vientos y mantener inalteradas las intensidades mayores. En el modelo RPP-2D se introdujeron rutinas que toman la información los campos de NCEP/NCAR y realizan una interpolación bilineal en todo el dominio.

El software HIDROBID II está basado en un esquema implícito de diferencias finitas, por lo que no tiene limitaciones serias en cuanto al valor del paso temporal de cálculo para evitar problemas de estabilidad numérica. En consecuencia, la elección de ese paso sólo está condicionado por criterios de precisión de los resultados. Dado que el fenómeno de escala más rápida del presente problema son las ondas superficiales, que se desplazan (sobre el flujo, mucho más lento) con la celeridad de Lagrange, el paso temporal de cálculo Δt debería ser elegido de forma tal de representar adecuadamente el desplazamiento de esas ondas sobre la extensión de una celda de la malla de cálculo. Entonces puede imponerse la siguiente condición sobre el paso temporal:

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{c_{\max}} \quad (2)$$

donde c_{\max} es la máxima celeridad que se pretende resolver adecuadamente. Ahora bien, como la energía de onda está concentrada básicamente en la plataforma continental, se ha considerado a la celeridad de las ondas en esa zona como limitante (la profundidad oceánica es significativamente mayor). La celeridad máxima en la plataforma es de alrededor de 30 m/s, con lo que resulta $\Delta t \leq 80$ seg. Se utilizó un paso de 60 segundos.

6 CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO

La calibración del modelo hidrodinámico RPP-2D se desarrolló en varias etapas en base al criterio de discriminar efectos, permitiendo así una validación y ajuste progresivo. Para esto se definieron cuatro escenarios de calibración: Escenario de Marea Astronómica Predicha, con referencia en los niveles de agua predichos por las Tablas de Mareas; Escenario de Marea Astronómica Registrada, niveles de agua observados en un período de relativa calma; Escenario de Marea Normal, niveles de agua y velocidades de corrientes registradas durante intervalos de tiempo en los que se incluyen efectos de viento sin la presencia de tormentas; Escenario de Tormenta, niveles de agua en períodos en los que se desarrollan eventos de tormentas significativos.

En la calibración del Escenario de Marea Astronómica se utilizaron las Tablas de Mareas del SHN para construir la onda de marea en el vértice Sudoeste del dominio del RPP-2D. Para esto fue necesario partir de los datos de la onda en la estación Mar del Plata, desfasarla e incrementar la amplitud de la misma para representar adecuadamente la oscilación en las distintas estaciones de control y lograr apariencia similar a la onda en la Estación San Blas, representativa en ese punto. La aplicación de un filtro pasa bajos a los datos provistos por las

Tablas de Mareas permitió distinguir una oscilación de baja frecuencia (período del orden de 14 días) en casi todas las estaciones, y de amplitud variable de una a otra estación. Dicha oscilación no puede ser explicada por el modelo, lo cual sugiere que puede ser espuria, procediéndose a su eliminación.

Las características de la onda de marea en toda la extensión del Borde Sur del dominio del modelo RPP-2D fueron analizadas con el Modelo Global de Marea RSC94³¹. Esta herramienta proviene de un modelo de respuesta generalizada y de la utilización de los pesos de sus respuestas (orthoweights), derivados de las funciones de Proudman. Estas funciones fueron computadas para una grilla de paso de 1 grado que cubre el área ubicada entre las latitudes 68° y -68°. La obtención onda de marea se basa en la contribución de las mediciones de los altímetros TOPEX-POSEIDON e información de alrededor de veinte estaciones de observación de marea. A partir del planteo de un decaimiento espacial de la onda del Borde Sur hacia el Este (partiendo del vértice SO del dominio) se realizaron corridas del modelo RSC94 en diez puntos de esta línea. Luego se buscaron el ángulo de ingreso y el parámetro de decaimiento exponencial de la onda de marea que ajustaran de mejor manera a los resultados obtenidos del modelo RSC94.

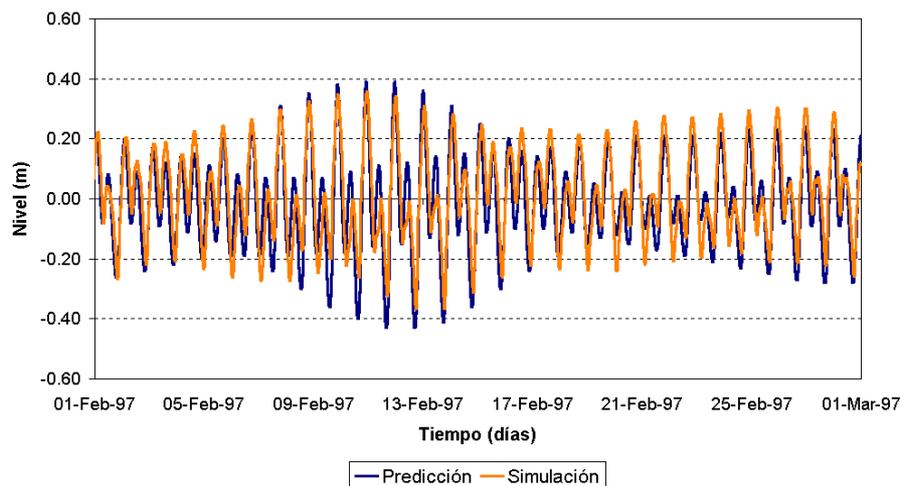


Figura 3: Colonia. Nivel de Agua. Marea Astronómica Predicha.

En el análisis del Escenario de Marea Astronómica Observada se procedió de igual manera que en el caso anterior. Las comparaciones en las estaciones de control se realizaron en períodos sin acción importante de los vientos, detectados en las series de alturas de mareas registradas. La calibración de velocidades de corriente se realizó para un Escenario de Marea Normal, utilizando registros de la compañía Hidrovía SA correspondientes a 10 estaciones localizadas en la zona media del río, relativamente cercanas entre sí. En este último caso se utilizaron los campos de vientos NCEP/NCAR en intervalos de tiempo con intensidades de viento normales.

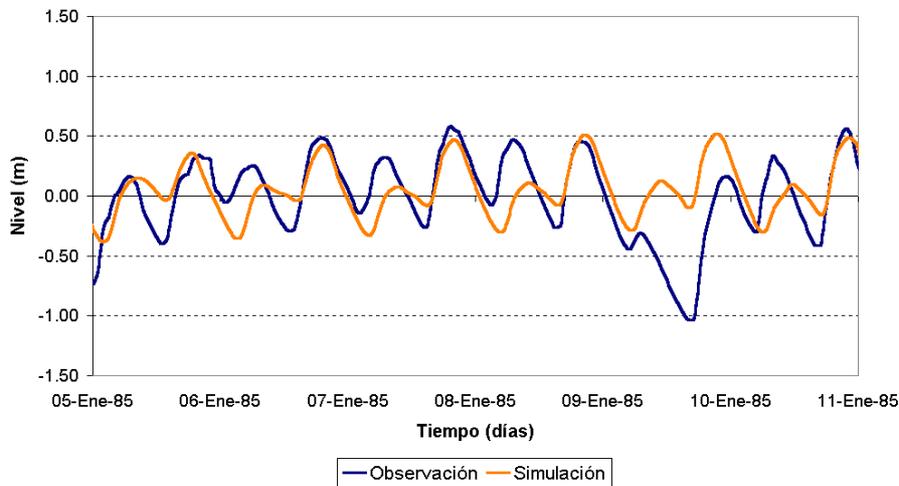


Figura 4: Buenos Aires. Nivel de Agua. Marea Astronómica Observada.

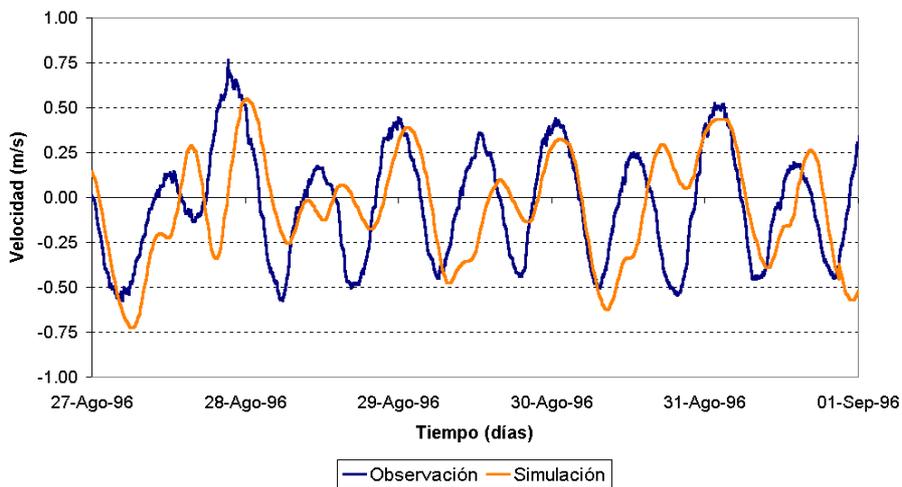


Figura 5: Río de la Plata Medio. Velocidades de Corrientes. Dirección Sur-Norte.

El Escenario de Tormenta se planteó a partir de la identificación de eventos de tormentas de variados niveles de significación y diferentes características en el período 1980-2000, contándose para cada uno de ellos con la información de campos de vientos de los reanálisis de NCEP/NCAR. A partir de los primeros ensayos numéricos efectuados, se comprobó que esta base de datos de vientos deben ser tomados con cautela dado el carácter global del modelo de reanálisis. Se obtuvo una formulación unificada para los parámetros de calibración (ley de corrección de las intensidades de viento) aceptándose un cierto grado de discrepancia cuantitativa en las tormentas individuales. A partir de esta calibración, se concluye que el modelo RPP-2D tiene capacidad de representación de las respuestas del sistema a eventos de tormentas, y que su calibración más precisa para estas situaciones depende de la disponibilidad de mejor información sobre los campos de vientos actuantes. A pesar de esto,

se considera que el dominio del modelo RPP-2D es lo suficientemente extendido como para incluir las distancias de desarrollo ("fetchs") de las tormentas.

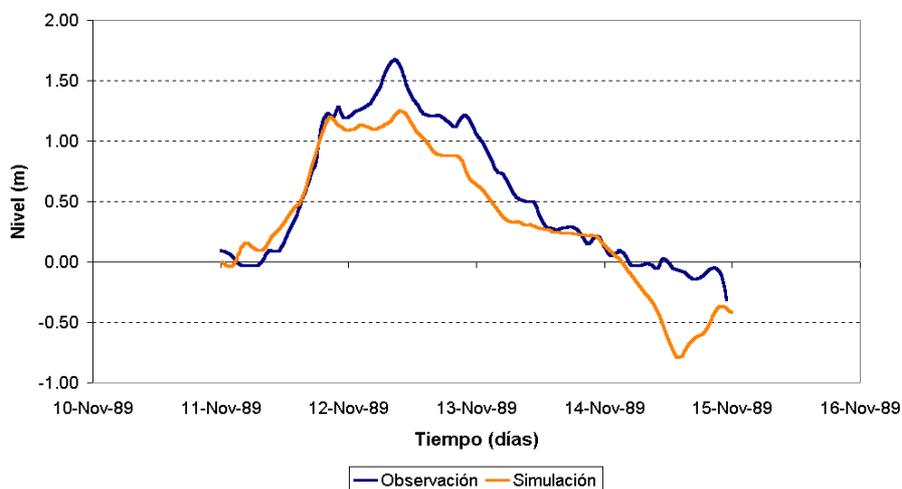


Figura 6: Torre Oyarbide. Nivel de Agua. Onda de Tormenta.

7 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

El análisis de la sensibilidad del sistema ante futuros cambios climáticos se propuso a partir de un ensayo en donde se estudian las diferencias de niveles medios del agua en cinco estaciones de control para distintas situaciones de forzantes.

Para establecer estas diferencias se adoptaron escenarios presentes y futuros. El escenario presente es el que se toma como base para las comparaciones, con una condición con vientos y otra sin vientos. El caudal total ingresante en el sistema es de $23200 \text{ m}^3/\text{s}$ ($5200 \text{ m}^3/\text{s}$ en el río Uruguay, $13500 \text{ m}^3/\text{s}$ en el río Paraná Guazú y $4500 \text{ m}^3/\text{s}$ en el río Paraná de las Palmas). La onda de marea ingresante se plantea a partir de la información de las Tablas de Mareas del SHN para el mes de febrero de 1997. Para la condición presente con vientos se toma un campo uniforme de intensidades y direcciones en todo el dominio, siendo 3 m/s la velocidad y 70° la dirección (aproximadamente NE-E).

El escenario futuro está basado en tres variaciones de forzantes: caudales, nivel medio del mar y vientos medios. En todos los casos se respetan el resto de las condiciones de borde respecto de la condición presente. Para variaciones de caudales se ensayaron dos opciones de caudales ingresantes en el Río de la Plata, $30000 \text{ m}^3/\text{s}$ y $75000 \text{ m}^3/\text{s}$, repartidos en igual proporción que en la condición presente. En cuanto al nivel medio del mar se realizó un ensayo con un nivel 25 cm mayor que el de la condición presente. Respecto a los vientos, la condición futura plantea un campo de vientos uniforme de 4 m/s y 90° (dirección E).

Las estaciones de control estudiadas son Martín García, Buenos Aires y Montevideo (en el río Interior), San Clemente (en el río Exterior) y Mar del Plata (en el Frente Marítimo).

El caso del caudal de $30000 \text{ m}^3/\text{s}$ demuestra el posible efecto de un incremento extraordinario en la media anual de los tributarios. Sólo un efecto menor efecto puede ser

esperado en Martín García, de acuerdo a las salidas del modelo RPP-2D. El efecto en Buenos Aires es despreciable, así como hacia aguas abajo.

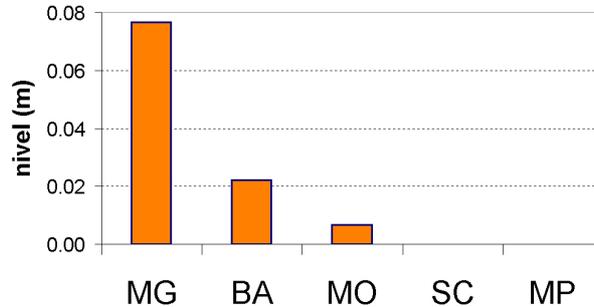


Figura 7: Diferencia de Nivel. 30000 m³/s.

El caso de una descarga de 75000 m³/s desde los tributarios se corresponde con los registros de las mayores crecidas en estos ríos. Se puede ver que estos caudales afectan considerablemente la parte interior del Río de la Plata, en valores comparables con el aumento del nivel del mar esperado para los próximos 100 años. Puede suceder que este tipo de crecidas se mantengan por un largo tiempo, lo que significaría un mayor probabilidad de ocurrencia junto con una Sudestada, incrementando lo impactos negativos de la inundación. Este tipo de crecidas ha tenido una mayor frecuencia durante las últimas décadas provocando un aumento en la vulnerabilidad de la franja costera del Río de la Plata Interior.

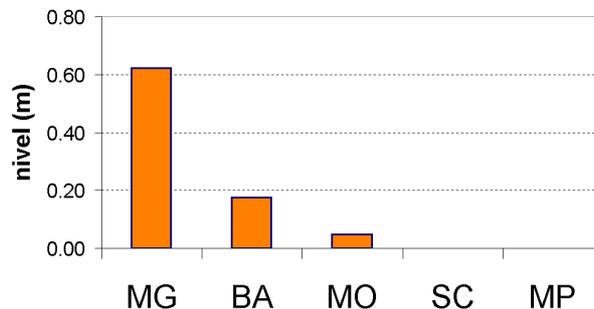


Figura 8: Diferencia de Nivel. 75000 m³/s.

Por lo tanto, cambios en los valores medios de los caudales de los tributarios del Río de la Plata parecen no tener efectos importantes en los niveles de agua. Sin embargo, eventos de crecida importantes pueden tener efectos considerables en la parte interior del Río de la Plata.

Un aumento de 25 cm en el nivel medio del mar en la zona del Frente Marítimo del Río de la Plata tiene un respuesta prácticamente en bloque. Hacia la zona interior del río los valores de diferencias en los niveles medios disminuyen muy levemente.

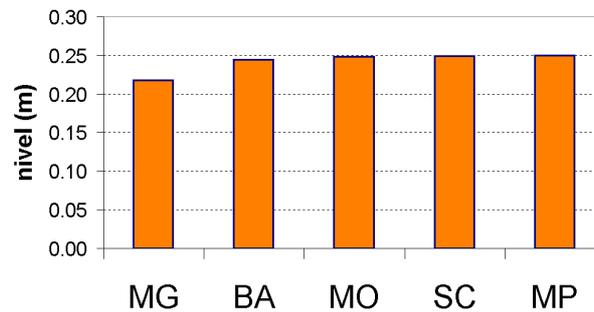


Figura 9: Diferencia de Nivel. + 25 cm.

Los resultados de la simulación para un incremento en la componente Este del viento indican que la respuesta del nivel medio del agua es mayor en la zona interior del río que en el sector oceánico. Esto se debe a la forma del río, esto también se observa en las ondas de marea que ingresan en el mismo. Dado que el esfuerzo del viento sobre la superficie del agua no es lineal con la intensidad del viento, el resultado que aquí se presenta debe ser tomado como una primera aproximación.

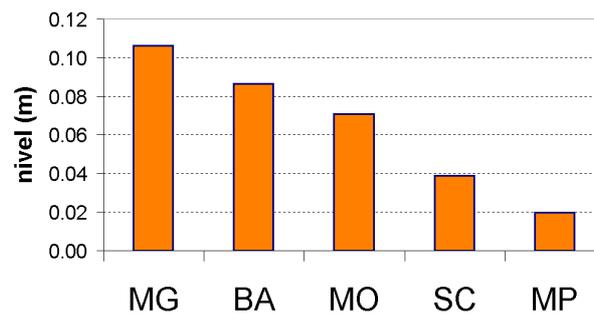


Figura 10: Diferencia de Nivel. Viento (FUT-PRES).

8 CONCLUSIONES

El producto del trabajo es un modelo hidrodinámico del Río de la Plata y de su Frente Marítimo, denominado RPP-2D, que muestra una buena capacidad de reproducción de la respuesta del sistema frente a la acción de los distintos forzantes.

La respuesta del modelo a la acción de los vientos puede considerarse satisfactoria en el sentido general de la capacidad de reproducir las principales tendencias. Un mejor ajuste cuali-cuantitativo sólo podrá lograrse a partir de mejor información sobre los campos de vientos, posiblemente a través de la implementación de un modelo regional de circulación atmosférica.

El modelo RPP-2D es capaz de proveer la información necesaria para obtener los períodos de retorno de inundaciones en alta resolución espacial para condiciones presentes y futuras, con el objeto de establecer con índices de vulnerabilidad social mapas de riesgo en la región.

9 REFERENCIAS

- [1] M.B. Framiñán, M.P. Etala, E.M. Acha, R.A. Guerrero, C.A. Lasta, O. Brown, *Physical characteristics and proceses of the Río de la Plata estuary*, In: G.M. Perillo, M.C. Piccolo, M. Pino (Eds), *Estuaries of South America, Their geomorfology and dynamics*, Springer-Verlag, Berlin, pp. 161-194, (1999).
- [2] J.D. Campos, C.A. Lentini, J.L. Miller, A.R. Piola, *Interannual variability of the sea surface temperature in the South Brazilian Bight*, *Geophysical Research Letters*, 26 (14), 2061-2064, (1999).
- [3] A.R. Piola, E.J. Campos, O.O. Möller, M. Charo, C. Martinez, *Subtropical Shelf Front off eastern South America*, *Journal of Geophysical Research*, 105(C3), 6565-6578, (2000).
- [4] A.N. Menéndez, *Description and modeling of the hydrosedimentologic mechanisms in the Rio de la Plata River*, VII International Seminar on Recent Advances in Fluid Mechanics, Physics of Fluids and Associated Complex Systems, Buenos Aires, Argentina, October, (2001).
- [5] G.N. Molinari, *Simulación numérica de la circulación en el Río de la Plata*, Tesis de grado para la Licenciatura en Oceanografía, ITBA (Argentina), Director: A.N. Menéndez, Informe LHA-INCYTH S5-017-86, (1986).
- [6] A.N. Menéndez, *Sistema HIDROBID II para simular corrientes en cuencos*, Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería, Vol 6, 1, (1990).
- [7] J. Albarracín, *Análisis de la Hidrodinámica del Río de La Plata a partir de una Simulación Numérica*, Tesis de grado para la Licenciatura en Oceanografía, ITBA (Argentina), Director: A.N. Menéndez, Informe LHA-INCYTH 065-001-88, (1987).
- [8] A.M. Olalde, *Simulación numérica de corrientes de deriva en el Río de la Plata*, Tesis de grado para la Licenciatura en Oceanografía, ITBA (Argentina), Director: A.N. Menéndez, Informe LHA-INCYTH 065-002-88, (1988).
- [9] C. Simionato, W. Dragani, M.N. Nuñez, M. Engel, *A set of 3-d nested models for tidal propagation from the Argentinean Continental Shelf to the Río de la Plata Estuary, Part I M2*, submitted to *Continental Shelf Research*, (2002).
- [10] P. Jaime, A.N. Menéndez, O.E. Natale, *Balance y Dinámica de Nutrientes Principales en el Río de la Plata Interior*, Informe INA 10.4-01, (2001).
- [11] M. Ré, A.N. Menéndez, *Modelo Hidrodinámico del Río de la Plata y su Frente Marítimo*, Informe INA-LHA 03-216-03, Comitente: Proyecto Freplata, (2003).
- [12] P.G. Wells, G.R. Daborn (Eds.), *The Rio de la Plata, An Environmental Overview. An EcoPlata Project Background Report*, Dalhousie University, Halifax, Nova Scotia. 248 p., (1997).
- [13] M.A. Balay, *El Río de la Plata entre la atmósfera y el mar*, Publicación H 621, Servicio de Hidrografía Naval, Buenos Aires, (1961).
- [14] E. D'Onofrio, M. Fiore, S. Romero, *Return periods of extreme water levels estimated for some vulnerable areas of Buenos Aires*, *Continental Shelf Research*, 19, 1681-1693, (1999).
- [15] M.A. Balay, *El Río de la Plata entre la atmósfera y el mar*, Publicación H 621, Servicio

- de Hidrografía Naval, Buenos Aires, (1961).
- [16] F.A. Bombardelli, A.N. Menéndez, J.D. Brea, J.L. Montalvo, G.O. Porro, *Estudio hidrodinámico del Delta del Río Paraná mediante modelación matemática*, Informe LHA-INCYTH 137-01-94, (1994).
- [17] P. Jaime, A.N. Menéndez, *Análisis del Régimen Hidrológico de los Ríos Paraná y Uruguay*, Informe INA-LHA 05-216-02, Comitente: Proyecto Freplata, (2002).
- [18] P.G. Wells, G.R. Daborn (Eds.), *The Rio de la Plata, An Environmental Overview. An EcoPlata Project Background Report*, Dalhousie University, Halifax, Nova Scotia. 248 p., (1997).
- [19] A.N. Menéndez, *Simulación numérica de flujos cuasi-bidimensionales a superficie libre*, Informe LHA-INCYTH S5-016-85, (1985).
- [20] A.N. Menéndez, *Sistema HIDROBID II para simular corrientes en cuencos*, Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería, Vol. 6, 1, (1990).
- [21] G.B. Whitham, *Linear and nonlinear waves*, Interscience, New York, (1974.)
- [22] A.N. Menéndez, R. Norscini, *Spectrum of Shallow Water Waves: An Analysis*, Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 108, No. HY1, January, (1982).
- [23] A.N. Menéndez, 1987, *On the accuracy of numerical methods for the two-dimensional shallow-water equations*, XXII IAHR Congress, Lausanne, (1987).
- [24] M. Abbott, *Computational Hydraulics*, Pitman, Boston, (1979).
- [25] A.N. Menéndez, *Sistema HIDROBID II para simular corrientes en cuencos*, Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería, Vol. 6, 1, (1990).
- [26] W. Dragani, comunicación personal, (2002).
- [27] CARP, *Estudio para la Evaluación de la Contaminación en el Río de la Plata*, SHN y SOHMA, (1989).
- [28] P. Jaime, A.N. Menéndez, *Modelo hidrodinámico Río de la Plata 2000*, Report LHA-INA 183-01-99, INA, Argentina, Septiembre, (1999).
- [29] E. Kalnay and Coauthors, *The NCEP/NCAR 40-Year reanalysis project*, Bulletin of the American Meteorological Society, 77, 437-471, (1996).
- [30] C. Simionato, W. Dragani, M.N. Nuñez, M. Engel, *A set of 3-d nested models for tidal propagation from the Argentinean Continental Shelf to the Río de la Plata Estuary, Part I M2*, submitted to Continental Shelf Research, (2002).
- [31] D.E. Cartwright and R.D. Ray, *Oceanic tides from Geosat altimetry*, Journal of Geophysical Research, 95, 3069-3090, (1990).